

Краткие сообщения

12

Нейтронные исследования на реакторе ИВВ-2М

© В.И. Бобровский

Институт физики металлов УрО РАН,
620990 Екатеринбург, Россия
e-mail: bobrovskii@imp.uran.ru

(Поступило в Редакцию 17 июля 2013 г.)

Методы, основанные на использовании потоков тепловых и быстрых нейтронов, предоставляют уникальные возможности для получения научной информации. Радиационное разупорядочение материалов помимо того что является следствием их эксплуатации в технике специального назначения может использоваться как эффективный технологический прием, позволяющий получать состояния вещества зачастую недостижимые никакими другими способами. Изучение отклика кристаллов на такое воздействие позволяет получать уникальную информацию об особенностях их электронной и решеточной подсистем, определяющих физические свойства вещества в исходном, необлученном состоянии.

Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ УрО РАН на реакторе ИВВ-2М является единственным в Урало-Сибирском регионе нейтронным центром, где проводятся нейтронные исследования в области физики конденсированного состояния, и единственным в России, на котором нейтронографическими методами исследуются также высокорadioактивные материалы. Мощность реактора — 15 MW. Плотности потоков тепловых и быстрых нейтронов в центре активной зоны — $1 \cdot 10^{14}$ и $4 \cdot 10^{14}$ n/cm²s соответственно. На реакторе имеется набор специализированных горизонтальных (для вывода пучков тепловых нейтронов из активной зоны) и вертикальных (для облучения образцов) экспериментальных каналов. В 2011–2012 г. работы в НМК ИФМ УрО РАН велись в рамках 10 программ.

В области радиационного материаловедения изучались процессы образования наноразмерных выделений в реальных реакторных сталях и модельных сплавах в зависимости от легирования и технологической обработки, идущие при облучении, деформации и термических воздействиях. Нами исследованы кристаллическая структура, фазовый состав и внутренние микронапряжения в необлученных и облученных разными флюенсами быстрых нейтронов образцах аустенитных, ферритно-мартенситных сталей и модельных сплавов [1–3]. Получены данные о выпадении карбидной и интерметаллидной нанопаз при различных режимах старения материалов, о внутренних напряжениях в них, а также об эволюции этого состояния в процессе облучения.

Облучение быстрыми нейтронами является эффективным методом создания немагнитных центров рассеяния электронов в металлах. Изучение влияния таких дефектов на свойства сверхпроводников позволяет выявить, реализуется ли в них обычный электрон-фононный механизм сверхпроводимости, или они относятся к системам

с нефононным взаимодействием. Для сверхпроводников с электрон-фононным взаимодействием в соответствии с теоремой Андерсона немагнитное рассеяние не разрушает пары, и температура сверхпроводящего перехода T_c в случае изотропного однозонного сверхпроводника при появлении таких дефектов не изменяется. Напротив, немагнитное рассеяние является распаривающим в случае „необычных“ сверхпроводников, для которых квазичастицами, приводящими к куперовскому спариванию электронов, вместо фононов являются магнитные возбуждения, и даже относительно слабое немагнитное рассеяние приводит к полному подавлению сверхпроводимости. В результате наших исследований [4,5] получены показательные результаты, доказывающие нефононный характер механизма сверхпроводимости в таких соединениях как (Ba, Ca)Fe_{2-x}Co_xAs₂, Lu₂Fe₃Si₅, Sc₅Ir₄Si₁₀, LaPt₄Ge₁₂, FeSe. Обнаружена неожиданно высокая чувствительность к радиационному разупорядочению соединения Mo₃Al₂C, свидетельствующая о необычном типе спаривания в нем, несмотря на то, что изучение поведения других его характеристик (электросопротивления, константы Холла, плотности электронных состояний на поверхности Ферми) под облучением, казалось бы свидетельствует о фононном механизме сверхпроводимости.

С использованием пучков медленных нейтронов в НМК ИФМ УрО РАН изучаются кристаллические и магнитные структуры различных материалов и их фазовый состав в исходном и облученном быстрыми нейтронами состояниях, фазовые переходы, диаграммы состояния, нанокристаллические структуры, выделения нанопаз. Ведется работа по развитию методов анализа данных нейтронных экспериментов.

В рамках этого направления изучается природа высокой проводимости твердых электролитов — перспективных материалов для новых источников тока: фосфатов,

металлофосфатов, алюминатов, ферратов щелочных металлов [6,7]. Такие соединения характеризуются наличием разупорядоченной подрешетки ионов проводимости, помещенной в жесткий каркас остальных ионов. Их высокая проводимость обусловлена аномально быстрой ионной диффузией, которая носит кооперативный характер благодаря геометрическим особенностям структуры, допускающим одно-, двух- или трехмерную диффузию в подсистеме щелочных ионов, находящейся в состоянии, промежуточном между жидкостью и твердой фазой. Анализ корреляций между катионной проводимостью и деталями структуры был проведен для соединения KAIO_2 в широком интервале температур 300–1023 К. С помощью программы TOPOS были обнаружены пять каналов миграции катионов K^+ , причем их поперечное сечение оказалось существенно зависящим от температуры, объясняя соответствующую зависимость анизотропии проводимости. Нейтронографически изучено влияние на подвижность ионов лития частичного замещения ионов фосфора изовалентными ионами ванадия в решетке LiMnPO_4 . Обнаружено значительное возрастание динамических среднеквадратичных отклонений этих ионов.

С помощью анализа диффузного рассеяния нейтронов в окрестностях брэгговских рефлексов соединений вида: $\text{Zn}_{1-x}\text{M}_x\text{S}_y\text{Se}_{1-y}$, $\text{M} = \text{Cd}, \text{Co}^{2+}, \text{Ni}^{2+}, \text{V}^{2+}, \text{Cr}^{2+}, \text{Fe}^{2+}$ изучались роль сорта и содержания допантов в формировании тонких особенностей кристаллической структуры разбавленных магнитных полупроводников во взаимосвязи с их магнитными свойствами и зонными характеристиками [8,9]. Установлено, что эффекты диффузного рассеяния тепловых нейтронов в соединении цинк-селен, легированном ионами $\text{Ni}^{2+}, \text{V}^{2+}, \text{Cr}^{2+}, \text{Fe}^{2+}$, существенно отличаются. Имеют место два типа локальных ян-теллеровских искажений кубической кристаллической решетки: нанодформации тригонального типа, обусловленные ионами Ni, V; искажения тетрагонального типа, индуцированные ионами Cr и Fe. Было установлено также, что элементы Mn^{2+} и Co^{2+} не относятся к классу ян-теллеровских ионов.

Наличие конкурирующих магнитных взаимодействий в веществах приводят к ряду интересных эффектов: скошенные и несоизмеримые магнитные структуры, спин-переориентационные переходы, волны спиновой плотности и т.д. Идеальной модельной системой соединений с конкурирующими анизотропиями является $\text{Tb}_x\text{Er}_{1-x}\text{Ni}_5$, где вдобавок энергия кристаллической анизотропии на порядок превышает энергию обмена. Наши нейтронографические исследования [10,11] показали, что соединение TbNi_5 при температурах ниже 10 К является не ферромагнетиком, как считалось ранее, а имеет несоизмеримую магнитную структуру, переходящую при $T > 10$ К в „lock-in“ структуру. Анализ с помощью нейтронографических данных магнитной фазовой диаграммы системы $\text{Tb}_x\text{Er}_{1-x}\text{Ni}_5$, построенной ранее на основании теоретических расчетов и магнитных

измерений, обнаруживает на ней своеобразное состояние, отличное от предполагавшейся тетракритической точки.

Информация о магнитной структуре соединений, демонстрирующих магнитокалорический эффект, является необходимой для понимания этого явления. Среди таких систем нами изучаются редкоземельные интерметаллиды типа R_5Pd_2 . Именно интерметаллид Ho_5Pd_2 показал рекордную в области низких температур относительную охлаждающую мощность. Кристаллическая структура системы R_5Pd_2 ($\text{R} = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Lu}$) обладает характерным для геометрически фрустрированных систем треугольным упорядочением редкоземельных атомов по позициям типа $48f$ и беспорядком в расположении редкоземельных атомов и атомов палладия в позициях $32e$. Комплексное изучение магнитных свойств соединений Ho_5Pd_2 и Tb_5Pd_2 и их магнитных структур средствами нейтронографии однозначно указывает на отсутствие дальнего магнитного порядка в системах R_5Pd_2 во всем интервале температур и подтверждает существование кластеров с ближним антиферромагнитным порядком при $T < T_c$.

Представляющее большой интерес с точки зрения улучшения магнитных характеристик создание композиций из аморфных и кристаллических наночастиц сплавов системы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ сталкивается с большими трудностями из-за проблем перевода этого соединения в аморфное состояние. Нам впервые удалось методом радиационного разупорядочения получить полностью аморфизованное магнитомягкое состояние сплавов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и $\text{Er}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ [12]. Аморфизация приводит также к сильному понижению температуры Кюри — на 100 К в $\text{Nd}_{12}\text{Fe}_{82}\text{B}$ и почти на 200 К в $\text{Er}_{12}\text{Fe}_{82}\text{B}_6$.

Для исследования разрешения нейтронных дифрактометров в настоящее время достаточно широко применяются симуляционные расчеты, основанные на использовании метода Монте-Карло. Однако значительный интерес представляет и аналитическое описание этих приборов, поскольку оно дает возможность осознанного поиска улучшения разрешения и оптимизации дифрактометра. Нам удалось разработать универсальный подход к описанию разрешения нейтронных дифрактометров с учетом пространственных эффектов и получить набор формул, относящихся к различным типам приборов. Были выявлены многочисленные геометрические эффекты [13]. Удалось также аналитически показать, что некоторые допущения, принимаемые при разработке симуляционных программ, являются некорректными.

В последнее время проводились также исследования гидрированных и азотированных сплавов редкоземельных металлов, сорбентов и мультиферроиков.

Работа выполнена при поддержке Государственного контракта Минобрнауки № 14.518.11.7020.

Список литературы

- [1] Воронин В.И., Бергер И.Ф., Гощицкий Б.Н. // ФММ. 2012. Т. 113. С. 925.
- [2] Сагарадзе В.В., Гощицкий Б.Н., Волкова Е.Г., Воронин В.И., Бергер И.Ф., Уваров А.И. ФММ. 2011. Т. 111. С. 82.
- [3] Арбузов В.Л., Гощицкий Б.Н., Данилов С.Е., Зуев Ю.Н., Карькин А.Е., Сагарадзе В.В. ФММ. 2010. Т. 109. С. 326.
- [4] Karkin A.E., Yangirov M.R., Akshentsev Yu.N., Goshchitskii V.N. // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 84. P. 054 541.
- [5] Карькин А.Е., Wolf T., Васильев А.Н., Волкова О.С., Гощицкий Б.Н. // ФММ. 2012. Т. 113. С. 480.
- [6] Voronin V.I., Shekhtman G.Sh., Blatov V.A. // Acta Cryst. B. 2012. Vol. 68. P. 356.
- [7] Kellerman D.G., Chukalkin Yu.G., Mukhina N.A., Gorshkov V.S., Semenova A.S., Teplykh A.E. // JMMM. 2012. Vol. 324. P. 3181.
- [8] Максимов В.И., Дубинин С.Ф., Суркова Т.П., Пархоменко В.Д. // ФТТ. 2012. Т. 54. С. 1062.
- [9] Максимов В.И., Дубинин С.Ф., Суркова Т.П., Пархоменко В.Д. // ФТТ. 2012. Т. 54. С. 1639.
- [10] Pirogov A.N., Park J.-G., Ermolenko A.S., Korolev A.V., Kuchin A.G., Lee S., Choi Y.N., Park J., Ranot M., Yi J., Gerasimov E.G., Dorofeev Yu.A., Vokhmyanin A.P., Podlesnyak A.A., Swainson I.P. // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79. P. 174412.
- [11] Pirogov A.N., Bogdanov S.G., Lee S., Park Je-Geun, Choi Y.-N., Lee H., Grigorev S.V., Sikolenko V.V., E.A. Sherstobitova, Schedler R. // JMMM. 2012. Vol. 324. 3811.
- [12] Теплых А.Е., Чукалкин Ю.Г., Богданов С.Г., Скрябин Ю.Н., Кудреватых Н.В., Андреев С.В., Валегов А.С., Козлов А.И., Чой Е., Пирогов А.Н. ФММ. 2012. Т. 113. С. 597.
- [13] Бобровский В.И. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. Т. 2. С. 5.